



HAL
open science

Étude du risque climatique en riz pluvial et de ses interactions avec les systèmes de culture dans la région du Lac Alaotra

Thomas Abrell

► **To cite this version:**

Thomas Abrell. Étude du risque climatique en riz pluvial et de ses interactions avec les systèmes de culture dans la région du Lac Alaotra. Sciences agricoles. 2013. dumas-00873780

HAL Id: dumas-00873780

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00873780>

Submitted on 16 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire de Fin d'Études



AGROCAMPUS OUEST
CFR Angers ou Rennes

2, Rue André le Nôtre, 49000
Angers

CIRAD
Montpellier

Avenue Agropolis, 34398 Montpellier
Cedex 5

FOFIFA
Tananarive,
Madagascar

Ampandranomby
BP, Antananarivo

Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage

Année universitaire : 2012.- 2013

Spécialité : Horticulture

Spécialisation ou option : Gestion durable du végétal en horticulture et aménagement du paysage

Etude du risque climatique en riz pluvial et de ses interactions avec les systèmes de culture dans la région du Lac Alaotra (Madagascar)

Par : Thomas Abrell

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation*
définitive)

ou son représentant

Date : .../.../... Signature

Non

Bon pour dépôt (version

Autorisation de diffusion : Oui

Devant le jury :
13/09/2013

Soutenu à ANGERS le

Sous la présidence de : Jean-Charles Michel

Maître de stage : Eric Scopel

Enseignant référent : Sylvain Charpentier

Autres membres du jury (Nom, Qualité) : Cannavo Patrice (MC Agrocampus), Mawois Marie (EC ESA)

Remerciements

Je voudrais remercier particulièrement mes encadrants, Eric Scopel et François Affholder, docteurs en agronomie en poste au Cirad de Montpellier pour m'avoir encadré tout au long de ce stage et pour m'avoir appris le sens de la rigueur scientifique.

Je remercie également le personnel du Cirad de Montpellier et Madagascar et du FOFIA, en particulier Krishna Naudin et Julie Dusserre, docteurs en agronomie en poste au Cirad de Montpellier, pour m'avoir aidé à récupérer les données nécessaires à la réalisation de cette étude. Merci également à Sandrine Auzoux, statisticienne en poste au Cirad de Montpellier, pour le temps passé à me former à l'utilisation de bases de données.

Je remercie tous les enseignants de la spécialité GDV d'Agrocampus Ouest, centre d'Angers pour avoir contribué à ma formation.

Je remercie les membres du jury qui ont bien voulu juger mon travail : Jean-Charles Michel, Patrice Cannavo, Sylvain Charpentier, Marie Mawois et Eric Scopel.

Etude du risque climatique en riz pluvial et de ses interactions avec les systèmes de culture dans la région du Lac Alaotra.

1. Introduction et problématique	1
1.1 Contexte général.....	1
1.2 L'agriculture de conservation.....	2
1.3 L'étude des performances agronomique.....	3
1.4 La modélisation agronomique.....	3
1.5 Objectifs de l'étude.....	4
2. Matériel et méthode.....	5
2.1 Fonctionnement du modèle PYE.....	5
2.1.1 Modèle conceptuel.....	5
2.1.2 Principaux processus.....	6
2.1.2.1 Le bilan hydrique.....	6
2.1.2.2 le mulch.....	6
2.1.2.3 La phénologie.....	8
2.1.2.4 Le LAI.....	9
2.1.2.4 La production de biomasse.....	10
2.2 Description des essais.....	11
2.3 Mise en place des simulations virtuelles.....	13
2.3.1 Données météorologiques.....	13
2.3.2 Itinéraires techniques.....	14
3. Résultats et discussions.....	15
3.1 Analyse du risque climatique dans la région du Lac Alaotra.....	15
3.1 Résultats du paramétrage.....	16
3.2.1 Calage des propriétés du mulch.....	16
3.2.2 Calage des paramètres physiologiques de la variété B22.....	16
3.2.3 Calage du bilan hydrique.....	18
3.3 Evaluation du stress hydrique subit par les cultures.....	20
3.4 Impact du couvert végétal sur les niveaux de rendement.....	22
3.5 Influence du taux de ruissellement sur l'effet des couvertures végétales	23
3.6 Sensibilité des différents systèmes au stress hydrique.....	24
3.6 Discussion.....	26
3.6.1 Analyse du dispositif expérimental.....	26
3.6.2 Utilisation d'un modèle d'estimation des rendements atteignables.....	26
3.6.3 Sensibilité des systèmes de culture pratiqués dans la région au risque climatique.....	26
4. Conclusion et perspectives.....	27

1 Introduction et problématique

1.1 Contexte général

L'île de Madagascar se situe dans un contexte tropical avec une saison des pluies allant de Décembre à Mars au cours de laquelle l'essentiel des cultures, tant pluviales qu'irriguées, sont pratiquées. Les systèmes de production sont principalement des petites exploitations familiales en polyculture-élevage. L'absence de saison vraiment froide favorise la prolifération des mauvaises-herbes, ravageurs et maladies. Par ailleurs le niveau de ressources financières des agriculteurs est assez faible (Penot et al., 2011) et les prix des intrants sont devenus prohibitifs au cours des dernières années. La lutte chimique contre les bio-agresseurs et l'amélioration de la fertilité des sols grâce aux engrais chimiques ne sont donc pas envisageables. Les rendements en riz, principale production de l'île, se situent donc entre 0 et 3 t/ha pour le riz pluvial (Michellon et al., 2005). Les contraintes étant importantes, l'objectif des agriculteurs n'est le plus souvent pas de maximiser les rendements mais plutôt de s'assurer de leur stabilité d'une année à l'autre (Hardaker et al., 1997).

Le bassin versant du Lac Alaotra est le grenier à riz de Madagascar, les rizières irriguées occupent l'essentiel des bas-fonds du lac mais de nombreuses parcelles non irriguées sont cultivées en riz pluvial. 100 000 ha sont ainsi exploités dans la région pour une production annuelle d'environ 80 000t (AVSF, 2010). La pression démographique croissante entraîne une surexploitation des terres avec réduction de la période de jachère et exploitation des terrains en pente en conditions pluviales strictes, ce qui augmente le risque d'érosion lors de la saison des pluies.

D'autre part le risque climatique est réputé important dans cette région : forte variabilité pluviométrique interannuelle et forte variabilité de la répartition des pluies en saison humide. Les différences de niveau de pluviométrie d'une année à l'autre sont susceptibles d'entraîner des variations de rendements. Des épisodes pluvieux importants sont fréquents et entraînent un risque élevé d'érosion par le ruissellement sur les terrains en pente. Cette érosion entraîne une accumulation de sédiments dans les parcelles des bas-fonds, contribuant certes à un maintien de la fertilité des sols, mais compliquant la gestion de l'eau pour l'irrigation (Dusserre et al., 2010).

Des organismes de recherche se sont rassemblés pour tenter de trouver des solutions répondant à ces problématiques de durabilité de la production de riz pluvial. Le FOFIFA (Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural), l'Université d'Antananarivo et le Cirad (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le développement) travaillent ainsi en coopération avec des acteurs locaux pour mettre au point des solutions adaptées aux conditions techniques et socio-économiques locales. L'objectif est de trouver des solutions qui puissent être prises en main par tous les agriculteurs et qui soient durables. Il faut pouvoir assurer des rendements stables sur le long terme tout en respectant l'environnement. Les différents problèmes observés étant entre autre liés au mauvais assolement et à l'abus de labour, le Cirad a proposé de développer l'agriculture de conservation qu'il a déjà pu tester dans de nombreux pays en développement.

1.2 L'agriculture de conservation

L'agriculture de conservation ou Semis Direct sous Couverture Végétale (SCV) regroupe un ensemble de techniques basées sur trois principes fondamentaux : pas de labour des parcelles, couverture permanente du sol par des couvertures végétales mortes ou vivantes et rotations adaptées pour le sol et le fonctionnement de l'exploitation. Cette technique a été développée dans les années 60 aux Etats-Unis avec pour objectif de lutter contre l'érosion et les pertes de sols (Charreton et al., 2006). Des adaptations ont été faites dans de nombreux pays et l'agriculture de conservation se répand, notamment dans les pays tropicaux où les facteurs de dégradation des sols sont plus violents et les conditions pédoclimatiques favorisent la dégradation de la couverture végétale au profit de l'amélioration des propriétés du sol. De nombreux avantages des SCVs par rapport aux techniques de labour conventionnel ont ainsi pu être démontrés dans les pays tropicaux. La fertilité du sol serait augmentée: la décomposition du paillage constitue un apport de carbone voire d'importante quantité d'azotes dans le cas d'une couverture de légumineuse (Scopel et al., 2005; Erenstein, 2003). La couverture végétale constitue également une protection thermique au rayonnement solaire (Husson, 2009) et limite le développement des adventices (Husson, 2009; Irintsoa Rasoloho, 2010).

Au niveau du bilan hydrique plus précisément la culture en SCV permettrait la diminution du taux de ruissellement limitant ainsi l'érosion hydrique et les pertes en fertilité qui sont liées (Scopel et al., 2005; Adekalu et al., 2007). En effet, le mulch diminue l'impact des fortes pluies sur les agrégats de sol en absorbant l'énergie cinétique des gouttes de pluies (Lal, 1979). Ainsi, Bernett et al., (1967) ont observé des pertes annuelles de sol de 3.4 t/ha sur des parcelles ayant un mulch constitué de paille de riz contre 20.2 t/ha pour des parcelles nues. Une quantité de 0.5 T/ha de paille de riz peut réduire d'un tiers la perte de sol qu'on aurait obtenue sur un sol nu (Meyer et al., 1970). Le mulch diminue également l'évaporation du sol, cela dépend de la densité et de la nature du paillis. Par exemple à quantité égale un mulch de blé est plus efficace qu'un mulch de sorgho ou de coton (Unger et Parker, 1976).

Des études ont été faites plus spécifiquement sur l'impact des SCVs sur les rendements via le bilan hydrique. Des résultats différents ont été observés selon les contextes. Dans tous les cas les SCVs réduisent les pertes d'eau par ruissellement à l'échelle de la parcelle (Scopel et al., 2004). Au Mexique il a été observé que la quantité d'eau additionnelle stockée dans le sol peut contribuer à la transpiration par la plante, donc permet une hausse des rendements alors qu'au Brésil cette quantité d'eau passe en drainage et n'est pas bénéfique pour la plante (Scopel et al., 2004). L'impact des SCVs sur le bilan hydrique dépend donc des propriétés du sol mais dépend également de la répartition des épisodes pluvieux sur la saison. En effet si les pluies sont réparties en épisodes pluvieux importants et irréguliers le risque de ruissellement sera plus important que si la pluviométrie est homogène sur l'ensemble de la saison. On définit le pouvoir tampon du SCV comme sa capacité à réduire le rapport infiltration/ruissèlement.

Ces avantages semblent particulièrement adaptés aux problématiques rencontrées dans la région du lac Alaotra, notamment dans la mesure où l'agriculture de conservation permet une baisse des niveaux de ruissellement, ce qui limite l'érosion et peut entraîner dans certains cas des hausses de rendement quand l'eau non-ruisselée passe en Transpiration. Les parcelles seraient ainsi moins sensibles aux aléas climatiques. On se propose donc ici d'étudier si le risque climatique est bien tamponné par l'utilisation de SCV dans les systèmes de riziculture pluviale de la région du Lac Alaotra.

1.3 L'étude des performances agronomiques

Une comparaison des rendements afin de tester la performance des systèmes est alors nécessaire. De telles études ont déjà été réalisées dans d'autres régions (Gerardeau, 2012 ; Bertrand, 2012). On s'intéresse alors plus particulièrement à la variabilité des rendements afin de comprendre de quelle manière celle-ci est influencée par la variabilité climatique. Cependant la variabilité des rendements est très difficile à décomposer car multifactorielle (climat, fertilisation, ravageurs, maladies,...) ce qui rend délicate la comparaison entre systèmes. C'est pourquoi certaines études s'attachent plus particulièrement à la comparaison des rendements potentiels (Affholder et al., 2012). Le rendement potentiel d'une parcelle est défini comme le rendement maximal qui serait atteignable en ne tenant compte que du climat comme facteur limitant la croissance (Van Ittersum et al., 1997). On peut aussi calculer le rendement potentiel limité par le stress hydrique qui tient également compte du stress hydrique subi par la plante par rapport à la disponibilité en eau du sol (Affholder et al., 2012). Les rendements potentiels sont donc supérieurs aux rendements observés car aucune cause environnementale n'est supposée limiter le développement des plantes. Ainsi au Kenya par exemple les rendements observés sont inférieurs à 25% aux rendements potentiels calculés pour le maïs, et jusqu'à 40% pour le manioc (Tittonell, 2008). Cependant cette méthode permet de s'affranchir de la variabilité des rendements due à des facteurs non maîtrisés (ravageurs, adventices, niveaux de fertilisation) pour se concentrer sur l'influence des variables d'intérêt comme les composantes du bilan hydrique (Affholder, 2012). On peut alors comparer la performance agronomique des systèmes étudiés.

Différentes approches sont possibles pour calculer le rendement potentiel d'une parcelle. Statistiquement on peut sélectionner dans un pool de parcelle celles dont le rendement est supérieur à 90% du rendement maximal observé et considérer que sur ces parcelles le rendement potentiel est atteint. Cependant cette hypothèse se base sur le fait que le rendement potentiel est atteint sur une partie des parcelles ce qui n'est pas toujours le cas. Il est également possible de calculer ces rendements potentiels en se basant sur des paramètres mesurés sur la parcelle et les données météorologiques disponible pour cette parcelle. Certains modèles de culture agronomiques permettent cette approche (Van Ittersum et al., 2012).

1.4 La modélisation agronomique

Grâce aux progrès faits au cours des cinquante dernières années dans le domaine de l'informatique et de l'agronomie pour la compréhension des dynamiques sol-plante-atmosphère de nombreux modèles de croissance biophysiques des plantes ont vu le jour. Depuis ses débuts, la modélisation agronomique a beaucoup évolué. L'idée qu'il n'existe pas de modèle universel, capable de simuler n'importe quelle situation agronomique, s'est progressivement imposée (Sinclair et al., 1996, Affholder, 2012). Il en résulte une multitude de modèles correspondant à divers degrés de complexité de la représentation du système simulé. En effet, lorsque le degré de complexité augmente, les erreurs du modèle dues à sa structure diminuent, mais en contrepartie les erreurs dues aux erreurs sur les paramètres augmentent (Passioura, 1996). Quel que soit le modèle, il ne faut pas perdre de vue la nécessité de disposer d'expérimentations réelles afin que le paramétrage soit fait correctement.

L'intérêt de passer par la modélisation dans le cadre de cette étude sera de pouvoir estimer des rendements sur une longue série climatique et pour différents systèmes de culture. On pourra également tester plus spécifiquement l'influence de certains facteurs dans la mise en place des rendements, notamment les composantes du bilan hydrique qui sont difficiles à quantifier sur le terrain.

On distingue un certains nombres de systèmes de culture permettant de simuler la riziculture : ORYZAIN (Aggarwal, 2002), ECOMERISTEM (Luquet, 2006) et CERES-Rice (Nain and Kersebaum, 2007), sont des modèles relativement complexes, élaborés pour simuler des cultures de riz sous contraintes hydriques et nutritionnelles. Ils comportent un très grand nombre de paramètres. PotentielYieldEstimator (Affholder et al., 2012) (PYE) est un modèle de culture beaucoup plus simple, car ne simulant pas l'effet de contraintes nutritionnelles, et permettant de calculer le rendement potentiel limité par le stress hydrique de nombreuses cultures et adapté au contexte tropical. Il simule le développement de la culture à pas de temps journalier et permet de sortir les rendements potentiels en fin de cycle. Il a déjà démontré son efficacité dans différents contextes tropicaux (Affholder, et al. 2012; Bertrand, 2011; Luu, 2012).

1.5 Objectifs de l'étude

On se propose dans cette étude d'utiliser le modèle PYE comme base de travail pour étudier la performance agronomique des systèmes de riziculture pluviale en SCV.

On cherchera notamment à vérifier l'effet tampon du SCV sur le bilan hydrique dans la région du Lac Alaotra et son rôle potentiel dans la stabilisation des rendements. En effet cela permettrait de s'assurer que la riziculture en SCV répond aux besoins des agriculteurs locaux d'avoir des rendements stables malgré la variabilité climatique interannuelle. A plus grande échelle cela permettrait également une amélioration des propriétés du sol et une baisse des niveaux d'érosion du bassin versant du Lac. On essaiera ensuite de mettre en avant le devenir de l'eau non-ruisselée dans le bilan hydrique pour les systèmes en SCV par rapport à ceux en labour conventionnel. L'objectif sera alors de déterminer si ce surplus d'eau infiltrée est utilisé par la culture pour la transpiration, et si elle permet ainsi de réduire la fréquence des stress hydriques, ou si elle vient alimenter le flux de drainage sous la zone colonisée par les racines. On pourra également utiliser le modèle pour tester différents scénarii techniques afin de comparer la performance des systèmes dans différents contextes.

Un certain nombre de questions vont alors constituer le fil de la démarche :

- Peut-on calibrer le modèle PYE pour les conditions du riz pluvial au lac Alaotra ?
- Dans quelles mesures le modèle PYE peut-il nous renseigner sur le poids du facteur hydrique dans la variabilité des rendements selon les systèmes de culture ?
- De quelle manière la riziculture en SCV permet une modification du bilan hydrique à l'échelle de la parcelle dans la région du Lac Alaotra ?
- Les rendements y sont-ils améliorés avec les cultures en SCV ?
- Quels paramètres des itinéraires techniques ont une influence sur la sensibilité du système de culture au risque climatique ?

Dans un premier temps il sera donc nécessaire de récupérer un certain nombre de données utiles au paramétrage du modèle PYE dans le contexte agronomique du Lac Alaotra. Le modèle paramétré sera ensuite utilisé sur une série climatique de 20 années relevée au Lac Alaotra sur différents itinéraires technique afin de répondre aux différentes problématiques.

2 Matériel et méthode

2.1 Fonctionnement du modèle PotentielYieldEstimator

Cette partie s'attache à présenter les principaux processus simulés dans le modèle qui sont utiles à l'étude et à expliquer de quelles manières le paramétrage du modèle permettra de les ajuster afin de faire correspondre du mieux possibles les sorties aux observations.

2.1.1 Modèle conceptuel

Le modèle PYE est un modèle construit dans le langage de programmation Visual Basic et interfacé à une base de données Microsoft Access. Il permet de simuler le développement d'une plante, définit par un certain nombre de paramètres génétiques, dans un environnement définit par le climat, le sol et la conduite de la culture, en l'occurrence la présence ou non de mulch et sa nature. Le schéma conceptuel de PYE est schématisé ci-dessous (figure1):

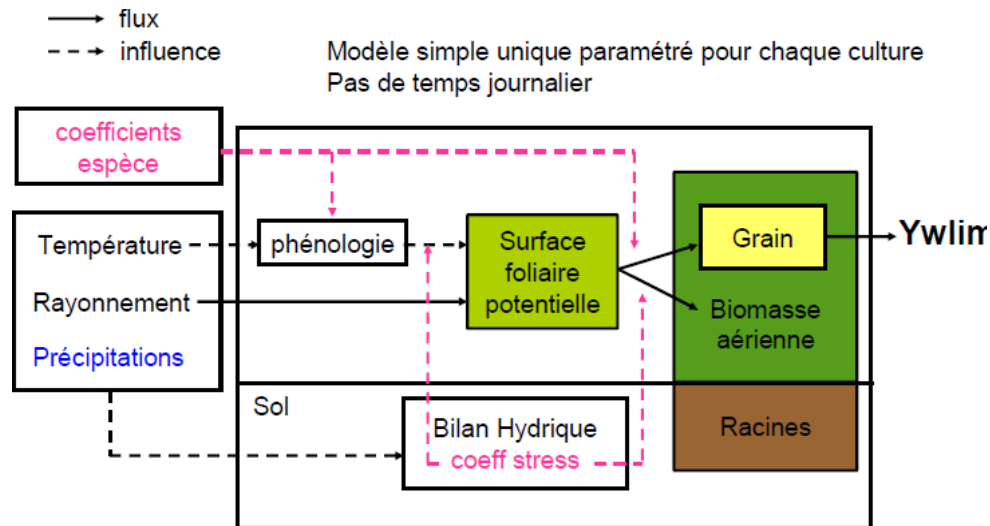


Figure 1: Schéma conceptuel du modèle PYE

La température définit la durée des différents stades phénologiques et l'évolution du LAI au cours de la culture. Le LAI permet de définir la part de rayonnement intercepté par la plante donc d'estimer la quantité de biomasse produite. Les coefficients de l'espèce et les propriétés du sol, via le bilan hydrique, influencent les différents flux donc limitent les rendements potentiels finaux atteints.

En cas de stress hydrique, lorsque la réserve du sol n'est pas assez remplie les stomates se ferment et la transpiration est réduite, ce qui ralentit la croissance de la plante. Ceci est assimilé dans le modèle à un seuil au-dessous duquel la quantité d'eau dans le sol réduit le développement du LAI et de la biomasse.

PYE est donc un modèle permettant de calculer des rendements potentiels en fonction des conditions pédoclimatiques et des caractéristiques de l'espèce. Un module de stress hydrique peut être activé, ce qui permettra dans le cadre de l'étude de déterminer la sensibilité des différents systèmes de culture aux variations pluviométriques interannuelles.

Des informations décrivant l'espèce, la variété, le sol, les conditions initiales et l'itinéraire de culture, ainsi que les données météorologiques journalières (températures, pluviométrie, ETP, rayonnement solaire) sont stockées dans différentes tables. Le modèle fonctionne sur un pas de temps journalier pour calculer les composantes du bilan hydrique et le développement des plantes. Les sorties sont stockées dans des tables regroupant les données calculées quotidiennement ou des résultats totaux de simulation (rendement, LAI maximum, drainage maximum).

2.1.2 Principaux processus

2.1.2.1 Le bilan hydrique

Le module de bilan hydrique est basé sur l'analogie du réservoir (van Keulen 1975), et plus particulièrement emprunté au modèle Sarra-Millet (Affholder, 1995) ajusté afin de prendre en compte l'effet du paillis sur l'évaporation en se basant sur les relations proposées par Scopel et al. (2003). Cet ajustement est établi à partir de paramètres du paillis caractérisant la capacité de stockage de l'eau par le paillis, son pouvoir couvrant, sa vitesse de décomposition. Ces paramètres ont été fixés aux valeurs proposées par Scopel et al. (1998) pour des paillis de maïs, puis ajustés lors du calage du modèle à partir des données relevées sur différents essais.

Les stress hydriques potentiellement subis par la plante sont ici caractérisés par des coefficients réduisant plus ou moins le taux de croissance quotidien du LAI et de la biomasse en fonction de l'état de remplissage de la réserve utile dans la zone de sol colonisée par les racines. Le stress est activé en dessous d'un certain seuil de remplissage de la réserve utile, il est d'autant plus important que la réserve est vide. Ces paramètres sont équivalents à ceux du modèle CropWat de la FAO, et ont été fixés aux valeurs fournies dans le bulletin FAO n°56 (FAO, 1998).

La pluviométrie, les coefficients de réduction du ruissellement par le paillis, la réserve utile du sol, le coefficient cultural de la plante simulée, son développement racinaire ainsi que les itinéraires techniques pratiqués sont autant de paramètres d'entrée qui peuvent modifier la dynamique de l'eau dans le sol lors des simulations.

Lors du paramétrage, la profondeur du sol concernée par l'évaporation et la taille de la réserve utile seront ajustées afin de faire correspondre les données d'humidité du sol simulées à celles observées sur le terrain.

2.1.2.2 Le mulch

Un apport de paillis est possible au cours de la simulation. Ce paillis va se dégrader au cours du temps, mais joue aussi un rôle de tampon sur le bilan hydrique en limitant l'évaporation et en stockant une partie de l'eau de pluie, limitant le ruissellement.

Depuis le jour d'apport du paillis sa quantité diminue à chaque pas de la simulation :

$$Q_{paillis}(t) = Q_{paillis_{t_0}} * \exp(-\alpha_{paillis} * t) \quad (1)$$

Avec :

alphapail, le taux de décomposition du paillis

Chaque jour une nouvelle fraction couverture du sol par le paillis est donc calculée car sa quantité diminue :

$$\mathbf{Fracsoilcover} = 1 - \exp(-\mathbf{betapail} * \mathbf{Qpaillis}) \quad (2)$$

Avec :

betapail, le pouvoir couvrant du paillis (ha.T⁻¹)

Un bilan hydrique propre au mulch est calculé, il permet de définir la quantité d'eau disponible pour le sol après une précipitation afin de calculer le bilan hydrique du sol. Afin de définir la part de précipitations disponible pour le sol, il faut calculer la quantité d'eau perdue par le mulch.

Les pertes en eau du mulch sont calculées en deux termes, l'un caractérisant une perte due à la décomposition du mulch depuis la veille, l'autre caractérisant la quantité d'eau évaporée par le mulch. L'évaporation potentielle du mulch est d'abord définie :

$$\mathbf{Eomulch} = \mathbf{EoSM} * (1 - \exp(-\mathbf{gammamulch} * \mathbf{Qpaillis})) \quad (3)$$

Avec :

EoSM, l'évaporation potentielle au sommet du mulch (mm)

gammamulch, le coefficient d'extinction de l'évaporation potentielle par le mulch

Le premier terme d'« évaporation », *epail1* définit la quantité d'eau perdue par décomposition du paillis :

$$\mathbf{epail1} = \mathbf{Smulch} * \left(\frac{\mathbf{Qpaillis}(\mathbf{jourstim} - 1) - \mathbf{Qpaillis}(\mathbf{jourstim})}{\mathbf{Qpaillis}(\mathbf{jourstim})} \right) \quad (4)$$

Avec :

Smulch, le stock d'eau du mulch (mm)

On peut alors définir le deuxième terme d'évaporation du paillis, *epail2* :

$$\mathbf{epail2} = \mathbf{Eomulch} - \mathbf{epail1} \quad (5)$$

Et si *epail2* > *Smulch*, alors *epail2* = *Smulch* (le mulch ne peut évaporer plus d'eau qu'il n'en contient)

C'est la variable *epail2* qui contient la quantité d'eau effectivement perdue le jour j.

On peut alors calculer la quantité d'eau disponible pour le sol, en commençant par définir la portion de pluie interceptée par le mulch, *intercep* :

$$\mathbf{intercep} = \mathbf{précipitations} * \mathbf{FracSoilCover} \quad (6)$$

La nouvelle quantité d'eau dans le mulch est donc :

$$Smulch = Smulch - epail2 + intercep \quad (7)$$

On peut alors calculer la quantité d'eau disponible pour le sol, qui va dépendre de si Smulch est en excès par rapport à la capacité maximale de stockage d'eau du mulch ou non

$$\text{Si } Smulch > CapaciteWMulch * Qpaillis \quad (8)$$

Alors,

$$EauVersSol = précipitations - intercep + Smulch - CapaciteWMulch * Qpaillis$$

$$Smulch = précipitations - intercep$$

Sinon,

$$EauVersSol = précipitations - intercep$$

Avec :

CapaciteWMulch, la teneur en eau maximale du paillis ($\text{mm.T}^{-1}.\text{ha}^{-1}$)

Les valeurs du pouvoir couvrant du paillis et de son taux de décomposition correspondent à celles mesurées sur le terrain. La quantité d'eau stockable dans le mulch a été ajustée afin de faire correspondre les données d'humidité simulées avec celles observées.

2.1.2.3 La phénologie

Le développement de la phénologie est basé sur une approche de type degrés-jours. On considère qu'un stade *i* est atteint le jour *n* lorsque :

$$\sum_{k+1}^n (f(T_m)) = TT(i) \quad (9)$$

Avec :

k, le jour où le stade (*i-1*) est atteint

T_m, la température moyenne du jour ($(T_{\max} - T_{\min})/2$), en °C

TT(i), constante de temps thermique du stade *i*, en °C.j⁻¹

f(T_m), une fonction définie comme suit :

$$\text{Si } T_m < t_{\min}, f(T_m) = 0$$

$$\text{Si } T_m > t_{\max}, f(T_m) = t_{\max} - t_{\min}$$

$$\text{Sinon, } f(T_m) = T_m - t_{\min}$$

Où $tdmin$ est la température-base en dessous de laquelle le développement de la plante est nul, et $tdmax$ la température-seuil au dessus de laquelle la vitesse de développement de la plante n'augmente plus.

Cinq stades de croissances du riz sont ainsi simulés dans le modèle, correspondants à des étapes clés du développement du riz : levée-montaison (*Juv*), Tallage max-épiaison (*Tall*), Epiaison-floraison plein (*Flo*), Floraison plein-sénescence (*Grain*), Sénescence-maturité (*Matu*). La variété B22 n'étant pas sensible à la photopériode, la photopériode n'est pas prise en compte dans le modèle.

La durée de ces stades a été ajustée à partir des dates de semis, levée, floraison et maturité relevées sur le terrain.

2.1.2.4 Le LAI

Le LAI est une variable clé du modèle qui va permettre de déterminer par la suite les quantités de biomasse produites. Chaque jour, un $dLAI$ est calculé en fonction du stade phénologique de la plante et de la densité de la culture. Cependant, il peut être modulé par un stress hydrique dans les deux premiers stades de développement (*Juv* et *Tall*) si les conditions de culture sont limitantes. L'équation qui permet la construction du $dLAI$ journalier est donnée ci-dessous :

$$dLAI = \frac{DLAI_{max}}{1 + \exp(5.5 * (Vlai_{max} - Ulai))} * TT * Turfac \quad (10)$$

Avec :

$dLAI$, le taux de croissance quotidien du LAI

$DLAI_{max}$, le taux de croissance quotidien maximal du LAI ($m^2.m^{-2}.jour^{-1}$)

$Ulai$, unité de développement foliaire

$Vlai_{max}$, $Ulai$ au point d'inflexion de la fonction $DLAI = f(ULAI)$

TT une fonction définie comme suit :

Si $T_m < tdmin$, alors $TT = 0$

Si $T_m > tdmax$, alors $TT = tdmax - tdmin$

Sinon, $TT = T_m - tdmin$

$tdmin$, température-base en dessous de laquelle le développement de la plante est nul ($^{\circ}C$)

$tdmax$ la température-seuil au dessus de laquelle la vitesse de développement de la plante n'augmente plus ($^{\circ}C$)

Turfac, coefficient de sensibilité de dLAI au stress hydrique, compris entre 0 et 1 selon le niveau de remplissage de la réserve utile dans la couche de sole occupée par les racines.

Densplt, densité de peuplement des plantes

Deltaidens, effet de la densité de peuplement sur le LAI

On obtient :
$$LAI(jourstm) = LAI(jourstm - 1) + dLAI \quad (11)$$

Les stades phénologiques étant calés avant la courbe de LAI, la phase où le LAI augmente et celle où il reste stable avant de diminuer sont ajustés, il suffit donc de caler le paramètre *DLAI_{max}*.

2.1.2.5 La biomasse

Le calcul de la biomasse est basé sur l'approche de Monteith (1977). La production de biomasse est liée à l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) et à la capacité de la plante à intercepter ce rayonnement.

Le rayonnement intercepté par les feuilles est converti en biomasse dont la quantité produite dépend de la capacité de la plante à opérer cette conversion (*E_{bmax}* : efficacité biologique maximale) qui dépend de l'espèce et de la présence ou non de stress hydrique.

$$dBiom = Ebmax * WSfact * Ftemp * \frac{raint}{100} \quad (12)$$

Avec :

dBiom, la biomasse totale quotidienne (T.ha⁻¹.jour⁻¹)

E_{bmax}, le coefficient de conversion maximal du rayonnement en biomasse

WSfact, le coefficient de sensibilité de *dBiom* au stress hydrique, compris entre 0 et 1 selon le niveau de remplissage de la réserve utile dans la couche de sole occupée par les racines.

Ftemp, le coefficient de sensibilité de *dBiom* à la température

raint, le rayonnement global journalier (MJ.m⁻²), définit comme suit :

Le rayonnement solaire intercepté par les feuilles est calculé selon la loi d'extinction de Beer-Lamber:

$$raint = 0.95 * ParsurRg * Rg * (1 - (\exp(-coefExtln * LAI))) \quad (13)$$

Avec :

Rg, le rayonnement global journalier (MJ.m⁻²)

ParsurRg, la fraction photosynthétiquement active du rayonnement (PAR/Rg)

CoefExtin, le coefficient d'extinction du rayonnement par le LAI

On obtient :
$$Biom(jour_{sim}) = Biom(jour_{sim} - 1) + dBiom \quad (14)$$

L'étude portant essentiellement sur la comparaison des rendements selon les systèmes de culture, le calage des rendements n'est pas nécessaire. On considère donc que le calage du LAI est suffisant.

2.2 Description des essais utilisés pour le paramétrage de PYE

L'objectif du paramétrage était d'utiliser un ensemble de données observées afin d'ajuster les sorties d'intérêt du modèle aux observations effectuées dans la région du Lac Alaotra. Le module mulch est calé dans un premier temps car il est supposé avoir des effets sur la physiologie de la plante. Il faut alors ajuster différentes propriétés du mulch virtuel afin de le faire correspondre à celui utilisé sur les essais : *Stylosanthes sp.* Le module physiologie : phénologie et mise en place du LAI est ensuite calé, on ajuste alors les paramètres variétaux du modèle à ceux de la variété utilisée : B22. Le bilan hydrique du sol est enfin calé afin de correspondre à ce qui est observé dans la région du Lac. Aucun essai n'a été mis en place pour répondre spécifiquement aux besoins de cette étude, il a donc fallu faire le point sur tous les essais disponibles et utilisables afin d'ajuster au mieux le modèle aux conditions du Lac Alaotra.

Les données utilisées proviennent principalement de deux dispositifs expérimentaux. Le premier correspond au centre agronomique du Lac Alaotra (CALA), situé à Ambohitsilaozana (17°41' S, 48°27' E, 770m alt.) dans la région du Lac Alaotra. Les précipitations sont en moyennes de 958mm par saison de culture (une saison allant de novembre à mars) mais présentent une forte variabilité interannuelle. Les températures annuelles maximales sont de l'ordre de 27°C, les minimales de l'ordre de 16°C. Le sol est classé de Ferralitique rajeuni (Razafimbelo, 2006). La réserve utile du sol étant un paramètre déterminant dans le calcul du bilan hydrique par le modèle et donc dans l'estimation de la sensibilité des différents systèmes de culture au risque climatique, il est important de spécifier au modèle une valeur correspondant aux sols de la région du Lac Alaotra. Elle est estimée à partir de la texture mesurée sur des échantillons provenant du Cala : 31,8% d'Argile, 42,4% de limon et 25,8% de sable. Ce sol correspondant à un type de sol observé au Brésil, on estime sa réserve utile à 120mm.m⁻¹ (Scopel, 2004). Les différents essais mis en place ont été conduits sur les parcelles du FOFIFA, en partenariat avec le Cirad.

Le deuxième dispositif utilisé pour le calage se situe à Ivory (19°33' S, 46°25' E, 953m alt.) dans la région des hautes-terres. Il contient 4 blocs de 12 parcelles sur lesquelles différentes mesures permettant l'étude de la physiologie des variétés utilisées sont effectuées. On s'intéresse plus particulièrement aux mesures de la durée des stades phénologiques et aux relevés de LAI effectués au cours de la saison.

Les données utilisées pour le calcul du taux de couverture du mulch proviennent d'un essai mis en place au CALA. Différents tonnages de mulch sont épandus sur des parcelles, on estime alors visuellement la portion de sol recouverte par le sol. On peut alors définir une régression de type exponentielle donnant la fraction de sol recouverte en fonction de la quantité de mulch appliquée, de type :

$$couverture = 1 - \exp(-\alpha_1 \times Q_{mulch}) \quad (15)$$

Avec :

α_1 , le pouvoir couvrant du mulch (T^{-1})

Q_{mulch} , la quantité du mulch appliqué

Pour le *stylosanthes sp.*, mulch utilisé sur les autres essais et pour le paramétrage, on obtient un pouvoir couvrant de 0.377 ha.t^{-1} de mulch ($R^2 = 0.991$).

Les données utilisées pour le calage du paramètre *alpha_pail* du modèle caractérisant la vitesse de décomposition du mulch proviennent d'essais mis en place au CALA. Des essais de suivi de dégradation des mulchs ont été mis en place durant la campagne 2011-2012. Une certaine quantité de mulch est placée dans des litter-bag en début de culture et ceux-ci sont pesés régulièrement le long du cycle. On obtient ainsi des quantités de mulch décroissantes tout au long de la culture (Rakotomalala, 2012).

Les données utilisées pour le calage du module physiologique proviennent des essais mis en place à Ivory. Les parcelles utilisées sont sélectionnées selon plusieurs critères afin de faire correspondre au mieux les données aux besoins du paramétrage :

- La variété cultivée est la variété B22, utilisée sur les parcelles d'essais du CALA
- La saison de culture correspond à une année sans stress hydrique afin de permettre le meilleur ajustement possible du LAI maximum potentiel. La saison 2012-2013 correspond à une année à forte pluviométrie pour la région d'Ivory, les pluies ont été régulières et aucun stress hydrique n'a été observé cette année-là.
- La fertilisation a été suffisante afin de ne pas limiter la production de biomasse. On choisit donc les parcelles à forte fertilisation (5T.ha-1, 150kg.ha-1 de superphosphate triple : 42% P2O5 et 40% CaO, 80kg.ha-1 de KCl, ainsi que 30N au semis et 30N après 20 jours).

Les différentes mesures de durée des stades et de LAI effectuées sur ces parcelles permettront le calage de paramètres génétiques de la variété B22 en conditions non-limitantes.

Les données utilisées pour le calage du bilan hydrique proviennent d'essais mis en place au CALA. Un essai de suivi de l'érosion fournit des données d'humidité des sols sur la saison. Le dispositif est composé de six parcelles de 6m de large et 3m de long. Trois parcelles sont situées sur une pente forte (25% N) et trois autres sur une pente faible (6% S). Le riz est cultivé avec une couverture de *Stylosanthes sp.*, chaque parcelle correspondant à un taux de couverture (0, 30 et 100% sur pente faible ; 0, 30 et 100% sur pente forte). Sur chaque parcelle 3 micro-lots d'érosion sont mis en place avec différents types de mesures par micro-lot : l'humidité est mesurée au cours de la saison pour plusieurs couches comprises entre 0 et 70 cm à l'aide de tube TDR (Topp, 1980), ce qui permet d'estimer la valeur du stock utile sur 70cm. A chaque pluie le ruissellement est également mesuré pour chaque parcelle, on peut ainsi estimer le taux de ruissellement moyen, correspondant à la quantité moyenne d'eau ruisselée par précipitation, pour chacune des parcelles.

Ces données d'humidité du sol sur 70cm ainsi que la quantité d'eau ruisselée par précipitations seront utilisées lors du calage. On ajustera dans un premier temps l'évolution

des stocks hydriques en utilisant les valeurs de ruissellement observées sur la parcelle et en désactivant le calcul du ruissellement quotidien en fonction de la pluviométrie et des propriétés du mulch dans le modèle. Puis on testera le calcul automatique du ruissellement par le modèle en lui spécifiant des paramètres calculés à partir de ces essais, tels que la quantité d'eau moyenne ruisselée par pluie et le seuil de pluie déclenchant un ruissellement.

Ainsi, même si aucun dispositif n'a été spécifiquement mis en place pour l'étude on dispose de suffisamment de données pour caler le modèle dans les conditions du Lac Alaotra.

2.3 Mise en place des expérimentations virtuelles

Une fois le modèle calé pour les conditions du Lac, on l'utilise pour simuler la riziculture pluviale sur une série climatique de 18 années prélevée dans la région du Lac Alaotra. Un certains nombres de systèmes de culture seront simulés, en adéquation avec les pratiques récurrentes dans cette région.

2.3.1 Données météorologiques

Une station météorologique virtuelle d'un certain nombre d'années est nécessaire afin de prendre en compte la variabilité climatique interannuelle dans le modèle. Les données de températures (T_{min} , T_{max}), de rayonnement solaire (S_{rad}), de précipitations (*pluie*), et d'EvapoTranspiration Potentielle (ETP) sont nécessaires. L' ETP est estimée à partir de la formule de Penman Monteith (Allen et al., 1998) à partir des données relevées localement.

Les données proviennent d'une station située au CALA (17°41' S, 48°27' E, 770m alt.) où des agents relèvent quotidiennement les données depuis 1993. Certaines données (T_{min} , T_{max} , S_{rad} ou *pluie*) manquent cependant pour certaines périodes. On se propose alors de combler ces lacunes par d'autres données provenant de stations proches : la station d'Ambatondrazaka dans la vallée de Matianina à 42km au Sud du Lac, disposant de données de juillet 2007 à février 2011. Cette station ayant également quelques lacunes, les données calculées à partir des observations satellites de la Nasa (power.larc.nasa.gov) seront utilisées à défaut. Les données seront alors calculés par la NASA pour les coordonnées exactes de la station du CALA.

Afin de déterminer l'adéquation des données provenant d'autres stations avec celles du CALA, on analyse la corrélation des relevés quotidiens entre les différentes stations pour les périodes où c'est possible. L'objectif étant de déterminer lesquelles des données provenant d'Ambatondrazaka ou de la NASA sont le plus adaptées pour pallier au vides de données du CALA. On se base alors sur le calcul du Root Mean Square Error (RMSE, Tojo Soler et al., 2005) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\text{stimulé} - \text{observé})^2}{\text{observations}}} * \frac{100}{\text{moyenne}(\text{observations})} \quad (16)$$

La simulation d'une variable observée (comme un ensemble de données Nasa par rapport aux données mesurées Cala) peut être considérée comme excellente pour un RMSE inférieur à 10%, bonne, entre 10 et 20%, correcte jusqu'à 30%, mauvaise sinon (Tojo Soler et al., 2005). On obtient pour les différentes comparaisons les valeurs suivantes :

Tableau 1: Comparaison de l'ajustement des différentes stations météo avec celle du Cala

variable	Stations comparée avec celle du Cala:			
	Nasa		Ambatondrazaka	
	nombre de points	RMSE	nombre de points	RSE
température minimale	336	13%	516	8.8%
température maximale	336	15%	516	12%
rayonnement solaire	488	30%	123	13%

Ainsi dans tous les cas il semble préférable d'utiliser les données provenant d'Ambatondrazaka pour pallier aux vides des relevés du Cala, les RMSE étant plus faibles (tableau 1). Quand les données d'Ambatondrazaka ne seront pas disponibles il faudra utiliser celles estimées par la NASA. La fin de l'année 2013 et le mois de décembre 1998 n'ayant pas pu être comblés, le nombre de saisons de culture simulables est porté à 18.

On dispose ainsi d'une station météorologique virtuelle correspondant à la région du Lac Alaotra allant de 1993 à 2013. On pourra alors simuler la riziculture pluviale selon différents itinéraires techniques sur une série météorologique représentative de la variabilité interannuelle locale.

2.3.2 Itinéraires techniques

Le principe des simulations virtuelles est de pouvoir tester un panel représentatif des pratiques en riziculture pluviale de la région du Lac Alaotra et de les tester sur la série climatique. La date de semis et la quantité de mulch épanchée sont deux paramètres très variables d'une parcelle à l'autre et qui sont pris en compte par le modèle. Ils sont également supposés être importants dans la sensibilité du système de culture au climat dans la mesure où les principaux risques sont les sécheresses en début de cycle qui sont supposées être amoindries par l'effet tampon du mulch.

L'étude d'un échantillon d'environ 900 parcelles sur quatre années fournit des informations sur les dates de semis pratiqués dans la région (Laurent, 2011). La répartition des dates de semis au cours de la saison est représentée ci-dessous (figure 2):

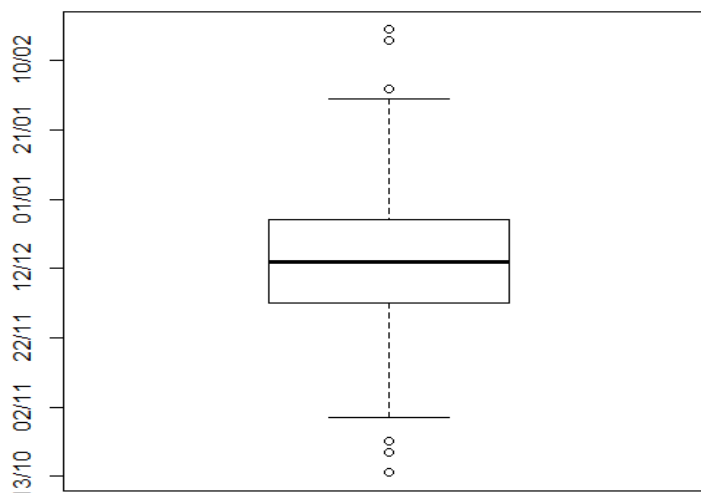


Figure 2: Variabilité des dates de semis pratiquées dans la région du Lac Alaotra

La majorité des parcelles sont semées durant le mois de décembre, la variabilité est cependant importante donc on testera des dates de semis allant de début novembre à fin janvier.

Des suivis de parcelles effectuées dans la région du Lac Alaotra ont permis d'estimer les quantités moyennes de mulch épandus sur les parcelles (Naudin et al., 2011). Les quantités moyennes de *Stylosanthes sp.* épandues sont de l'ordre de $4t.ha^{-1}$, pour des valeurs allant de 1 à $8t.ha^{-1}$. On testera des valeurs de 2, 4 et $6t.ha^{-1}$ correspondant à la plus grosse majorité des parcelles.

Enfin, la réserve utile des sols des expérimentations étant assez importante et réduisant les effets de stress hydriques éventuels, on pourra tester un panel de réserves plus faibles et correspondant à ce qui peut également être observé dans la région pour des sols ferrallitiques ; soit des valeurs comprises entre 60 et $120mm.m^{-1}$.

3 Résultats et discussion

3.1 Analyse du risque climatique dans la région du Lac Alaotra

On dispose de données météo sur 18 années consécutives. On s'intéresse ici plus particulièrement aux précipitations dans la mesure où on teste l'impact des systèmes de culture sur le bilan hydrique à travers le modèle. Le risque climatique concerne alors principalement les précipitations.

A Madagascar la saison des pluies se déroule habituellement entre Novembre et Avril, le graphique ci-dessous représente la variabilité du cumul des pluies tombées pendant cette période sur les 18 saisons.

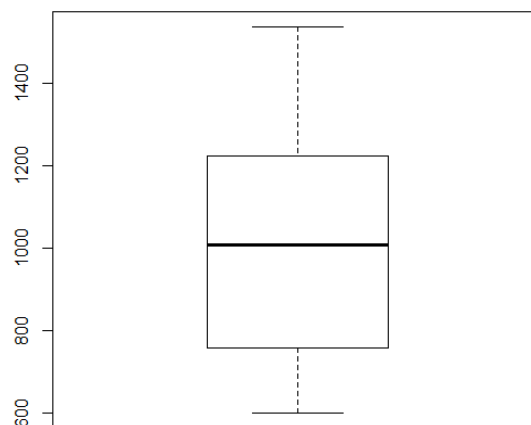


Figure 3: Variabilité interannuelle de la pluviométrie cumulée dans la région du Lac Alaotra

La figure 3 met en avant la forte variabilité interannuelle de la pluviométrie dans la région du Lac Alaotra. Les précipitations cumulées lors d'une saison des pluies sont en moyenne de 991.9 mm pour des extrêmes allant de 599.5 à 1536.6 mm de pluie par saison. Cependant un faible niveau de pluviométrie peut ne pas représenter de risque pour la parcelle si la répartition des épisodes pluvieux est régulière au cours de la saison. On peut alors calculer le nombre de sécheresses correspondant aux périodes de 10 jours sans précipitations pour chaque saison. On obtient un nombre moyen de 2.5 sécheresse par saison, pour des

valeurs allant de 1 à 6. La variabilité interannuelle de la répartition des pluies est donc également importante.

Deux points importants caractérisent la variabilité interannuelle de la pluviométrie dans la région du Lac : forte variabilité de la quantité de précipitations cumulées tombée au cours d'une année, et nombre élevé et variable de sécheresses par année caractérisant une forte variabilité de la répartition des pluies. Ainsi une année à forte précipitations peut représenter un risque pour la culture si les pluies sont mal réparties et inversement.

3.2 Résultats du calage

3.2.1 Calage du taux de décomposition du paillis

Le calage du taux de décomposition du paillis est effectué à partir de données d'un essai de suivi de la masse de paillis sur la parcelle au cours d'une saison (Rakotomalala, 2012). La simulation est lancée avec une quantité de paillis initiale égale à celle mise en place lors des essais. On procède ensuite par essai-erreur pour ajuster le paramètre α_{paillis} du modèle correspondant au taux de décomposition du paillis (cf. eq. (1)). Après calage de cette fonction on obtient le résultat suivant :

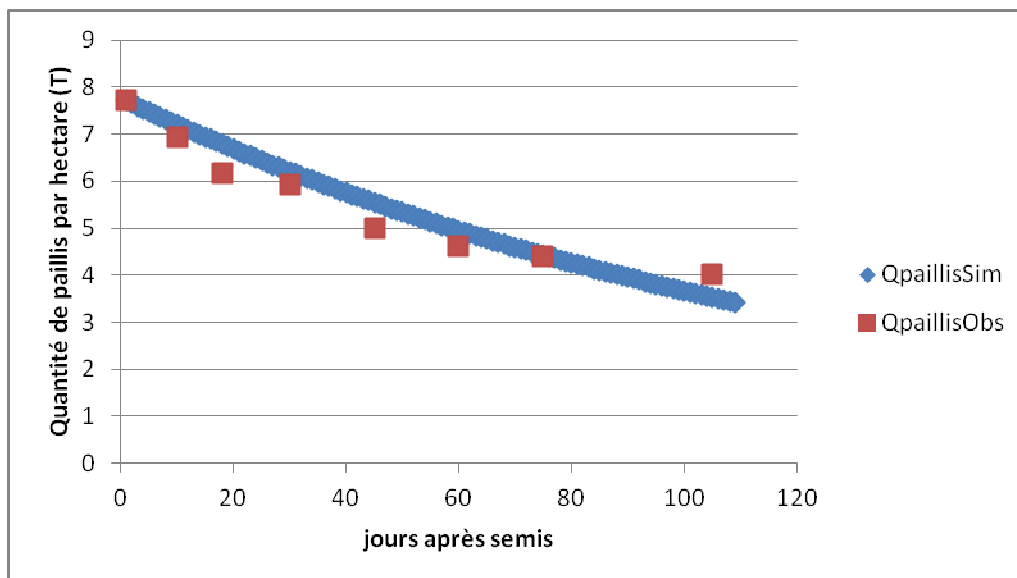


Figure 4: Evolution de la quantité de paillis présente sur la parcelle au cours de la saison

Ce résultat étant acceptable on fixe la valeur d' α_{paillis} obtenu à 0.0075j^{-1} . Cette valeur correspond à un paillis de *Stylosanthes sp.* qui sera utilisé pour la suite des simulations.

3.2.2 Calage des stades phénologiques

Le calage du module physiologique de PYE consiste à ajuster les paramètres génétiques de la variété utilisée, B22, afin de faire correspondre les sorties aux différentes

observations de terrain. Dans un premier temps la durée en degré-jour des stades phénologiques est ajustée, puis la courbe de mise en place du LAI.

Une simulation est lancée avec les conditions de l'essai d'Ivory, et avec comme valeurs initiales de la durée des stades celles obtenues lors du paramétrage de la variété F161 avec le même modèle (Bertrand 2011). On procède alors par essai-erreur en jouant sur la durée des cinq stades phénologiques du modèle pour ajuster les sorties aux observations : en l'occurrence la durée entre semis et floraison et entre floraison et maturité. On obtient les résultats suivant :

Tableau 2: Ajustement de la durée des stades phénologiques simulés aux observés

stade phénologique	jours après semis observés	jours après semis simulés	nombre d'observations
floraison	81	79	4
maturité physiologique	115	113	4

Cet ajustement étant acceptable, on fixe la durée des stades obtenus pour la suite du paramétrage. La durée en degrés de ces cinq stades est donnée ci-dessous (Tableau 3):

Tableau 3: Constante thermique des stades phénologiques obtenues après paramétrage (variété B22)

Code du stade	Nom du stade	Constante thermique (°C)
<i>Juv</i>	Levée-montaison	400
<i>Tall</i>	Tallage max-épiaison	420
<i>Flo</i>	Epiaison-pleine floraison	210
<i>Grain</i>	Pleine floraison-sénescence	100
<i>Matu</i>	Sénescence-maturité	330

3.2.3 Calage du LAI

Une fois la durée des stades phénologiques ajustée il faut ajuster la courbe de mise en place du LAI. Pour cela on utilise les données issues des mêmes parcelles que celles utilisées pour le calage des stades phénologiques. Le LAI a été mesurée a trois dates, respectivement 56, 60 et 90 jours après semis. Ces points permettent d'ajuster l'évolution du LAI simulé avec celui observé, pour cela on ajuste le paramètre *dlaimax* du modèle correspondant au taux de

croissance quotidien maximal du LAI. La durée des stades étant déjà ajustée, le LAI max doit être atteint lors de la pleine floraison. On obtien le résultat suivant (figure 5):

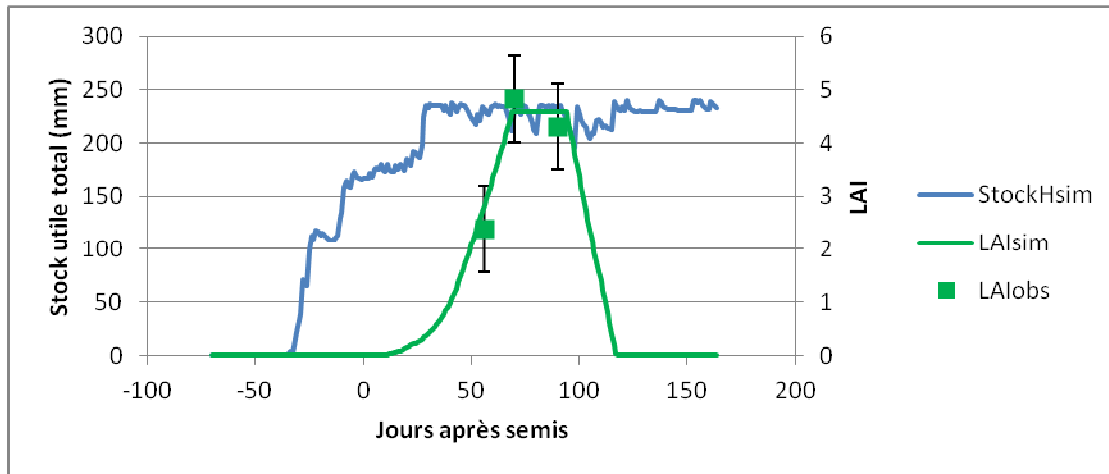


Figure 5: Résultats du calage du LAI, évolution du LAI et du stock utile lors de la saison

L'ajustement entre LAI simulé et LAI observé est satisfaisant. L'évolution du stock utile total sur 2 mètres lors de la simulation conforte l'hypothèse selon laquelle la culture ne subit pas de stress hydrique cette année-là. En effet lors de la mise en place du LAI la réserve utile est toujours remplie à plus de 80% ce qui n'induit aucun stress hydrique pour la culture. En effet en l'état le modèle ne considère qu'il y a stress hydrique réduisant le développement du LAI que lorsque la réserve utile est remplie à moins de 75%. Cette valeur est fournie dans le bulletin FAO n°56 (FAO, 1998). La valeur de $dlaimax$ pour la variété B22 utilisée pour la suite des simulations est donc fixée à $0.00019 \text{ m}^2 \cdot \text{plante} \cdot \text{jour}^{-1}$.

3.2.4 Calage du bilan hydrique

Le bilan hydrique est ensuite ajusté afin de paramétrer les évolutions du stock hydrique au cours de la saison. Les données proviennent des essais de suivi d'érosion du CALA. L'humidité du sol sur 70cm a été mesurée pour des parcelles en pente de 6 et 25% et pour des taux de couverture de 0, 30 et 100% (3 plots par parcelle) au cours de la saison 2012-2013. Les ruissellements ont également été mesurés après chaque épisode pluvieux, permettant d'estimer les taux de ruissellement en fonction des quantités de paillis et de la pente.

Dans un premier temps les simulations sont lancées en désactivant le ruissellement du modèle et en remplaçant la pluie quotidienne par la valeur (pluie-ruissellement) observée. Les paramètres $CapaciteWMulch$, la teneur en eau maximale du paillis ($\text{mm} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$), $Zsurf$, la profondeur de sol concernée par l'évaporation (cm) sont calés afin de faire correspondre

l'évolution des stocks hydriques simulés et observés. Après ajustement par essai erreur on obtient les résultats suivants (figure 6):

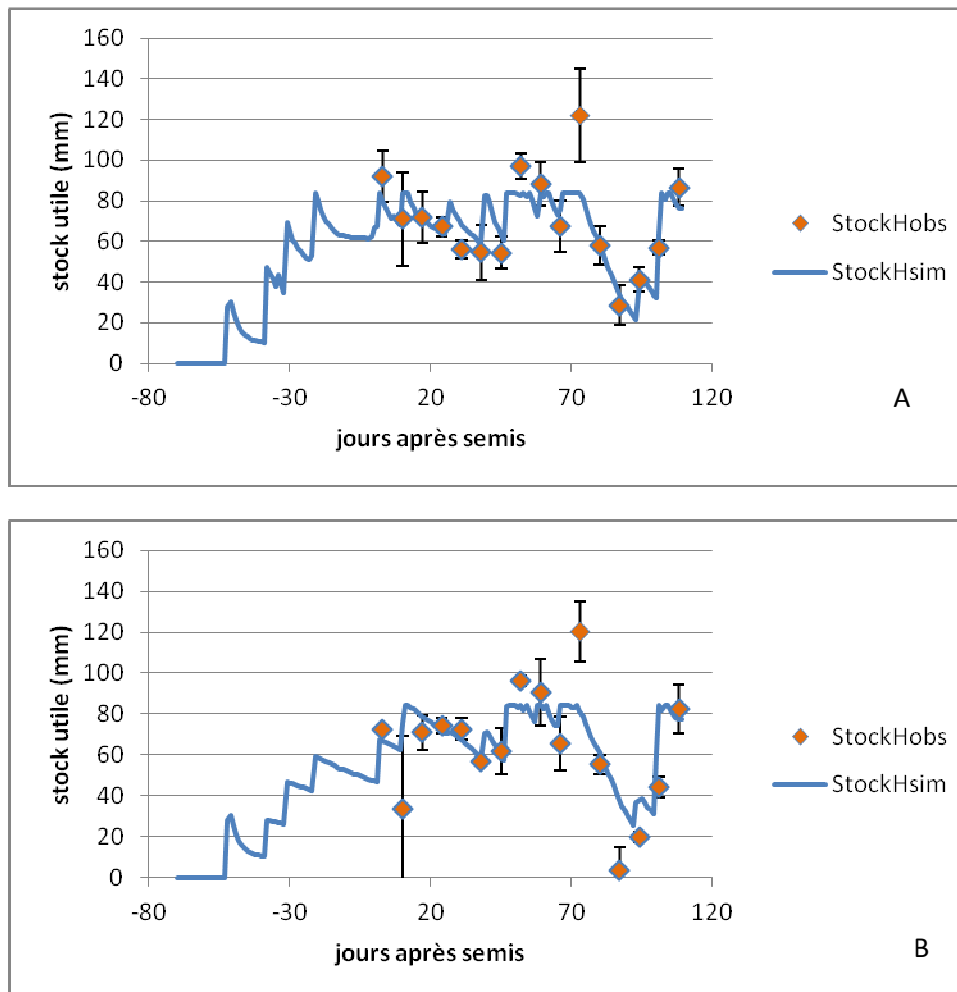


Figure 6: Evolution du stock utile sur 70 cm au cours de la saison. En A simulation sans mulch sur pente faible. En B simulation avec 100% de sol couvert sur pente forte. Les données de ruissellement sont celles observées

L'ajustement est acceptable dans ces deux cas. Les mesures d'humidité ont été effectuées avec des humidimètres TDR (Topp, 1980) mis en place sur les parcelles en début de cycle. Les écarts simulé/observé en début de cycle peuvent s'expliquer par un mauvais contact entre le tube et le sol qui n'est bien établi qu'au bout de quelques jours. Certaines valeurs observées sont nettement supérieures à celles simulées par le modèle. Si cette erreur est récurrente le même jour de mesure quelque soit le système cela peut être dû au fait que l'humidité a été mesurée trop tôt après l'épisode pluvieux. Le sol n'étant alors pas totalement ressuyé le stock utile est surestimé.

L'ajustement est néanmoins acceptable pour l'ensemble des systèmes simulés, on relance alors des simulations en prenant cette fois en compte le ruissellement à travers le modèle, c'est-à-dire en calculant à chaque pluie la quantité d'eau ruisselée. Pour cela un coefficient de ruissellement définissant la fraction de pluie ruisselée est calculé pour chaque taux de couverture et chaque pente. On représente pour cela les ruissellements quotidiens en fonction des pluies quotidiennes. Une régression linéaire de type $E_{\text{ruisselée}} = a \times \text{Pluie} + b$ (17) permet alors d'estimer a , la proportion d'eau ruisselée par épisode pluvieux. Ces nouvelles simulations tenant compte du ruissellement simulé permettent de valider ces coefficients de ruissellement ainsi que les autres paramètres du bilan hydrique ajustés précédemment. On obtient alors les courbes suivantes (figure 7) :

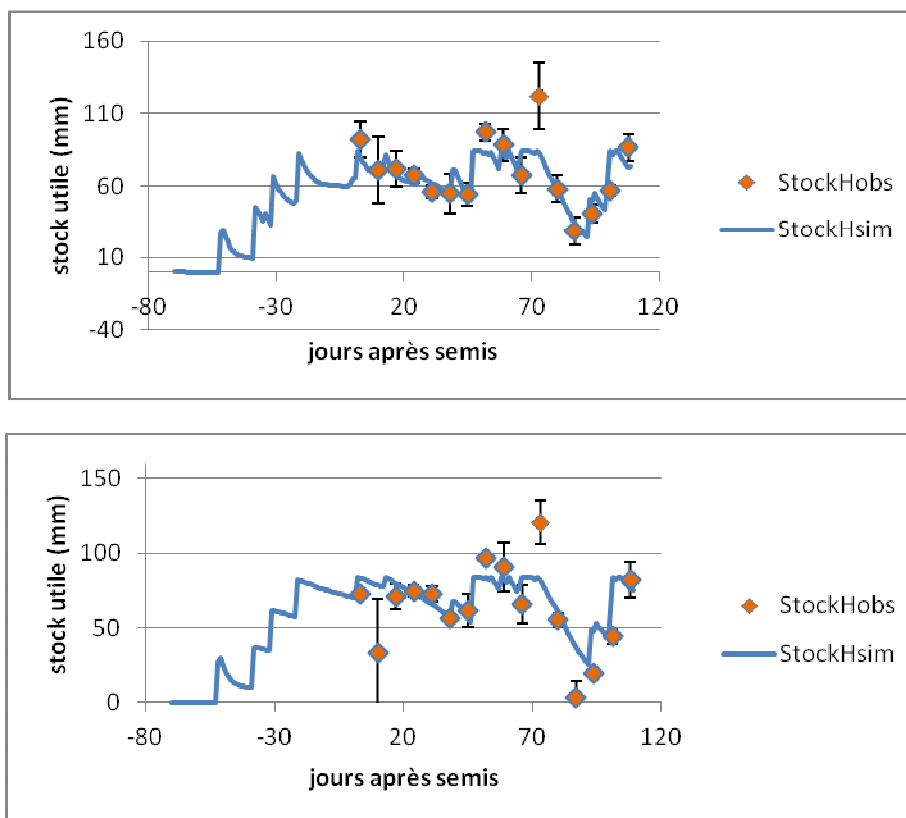


Figure 7: Evolution du stock utile sur 70 cm au cours de la saison. En A simulation sans mulch sur pente faible. En B simulation avec 100% de sol couvert sur pente forte. Les données de ruissellement sont calculés par le modèle à partir des taux de ruissellement obtenus sur le terrain

L'ajustement entre les stocks simulés et observés est acceptable dans ces deux cas et pour les autres figures (cf. ANNEXE I). les mêmes commentaires que précédemment s'appliquent pour expliquer certains écarts simulé/observé. On fixe alors les paramètres ajustés lors de ce paramétrage aux valeurs suivantes :

$CapaciteWMulch$, la teneur en eau maximale du paillis ($mm.T^{-1}.ha^{-1}$) fixée à $1mm.T^{-1}.ha^{-1}$ de mulch.

$Zsurf$, la profondeur de sol concernée par l'évaporation (cm) fixée à 20cm

3.3 Evaluation du stress hydrique subi par les cultures

Le modèle a été calibré pour pouvoir simuler la riziculture pluviale selon les conditions pédoclimatiques locales. Les simulations sont lancées avec autant d'itinéraires techniques qu'il y a de combinaison de paramètres testés possibles (cf. 2.3.2), on obtient alors pour chaque parcelle simulée un rendement potentiel limité par le stress hydrique Y_w . On relance alors les simulations en désactivant cette fois les effets du stress hydriques sur la parcelle, afin d'obtenir les rendements potentiels atteignables en conditions hydriques non-limitantes Y_0 . On peut alors calculer la perte de rendements due au stress hydrique pour chaque saison avec la formule :

$$perte = \frac{Y_0 - Y_w}{Y_0} \quad (18)$$

Le tableau ci-dessous représente la perte de rendements moyens due au stress hydrique ainsi que les précipitations cumulées pendant la culture par saison :

Tableau 4: moyenne des pertes de rendement dues au stress hydriques et cumul des précipitations par saison

année	perte (%)	cumul de pluies (mm)	année	perte (%)	cumul de pluies (mm)
1993	18	1055	2003	32	709
1994	31	837	2004	24	1384
1995	18	1536	2005	33	623
1996	20	1322	2006	15	1311
1997	33	1008	2007	43	818
1999	45	599	2008	19	1138
2000	49	1081	2009	22	1073
2001	37	807	2010	23	602
2002	23	1369	2011	15	911.6

Les pertes sont très importantes et très variables d'une année à l'autre ($28 \pm 11\%$ en moyenne). Ainsi le stress hydrique semble être un facteur déterminant dans le développement des cultures, et est en bonne partie responsable des faibles niveaux de rendement observés dans la région. L'utilisation de systèmes de culture supposés améliorer le bilan hydrique au niveau de la parcelle serait donc justifiée dans la mesure où une réduction du stress hydrique subi par les cultures pourrait fortement améliorer les rendements. Au regard des quantités de pluie cumulées tombées par saison de culture (tableau 4) il semble que la perte due au stress hydrique soit d'autant plus élevée que la quantité de pluie tombée soit faible.

On peut alors essayer de déterminer une corrélation entre ces les pertes de rendement et la pluviométrie cumulée. La corrélation étant très mauvaise ($R^2=0.27$), d'autres facteurs que la pluviométrie expliquent les pertes de rendement. Une perte élevée une année à forte pluviométrie peut par exemple s'expliquer par une mauvaise répartition des pluies sur la saison. Ainsi l'année 2000 a profité de fortes précipitations (1081mm) mais a subi quatre période de 10 jours consécutifs sans précipitations, ce qui explique une forte perte de rendements due au stress hydrique (49%).

3.4 Impact du couvert végétal sur les niveaux de rendement

Les SCV sont supposés améliorer le bilan hydrique du sol en réduisant le ruissellement de surface. On cherche ici à mettre en avant l'effet du mulch sur le bilan hydrique et les rendements.

Les simulations sont lancées pour tous les itinéraires techniques simulés. On calcule alors par saison la moyenne des rendements obtenus par quantité de mulch épanchée (0, 2, 5 et 8t.ha⁻¹). On peut alors exprimer le gain de rendement dû à l'apport de mulch pour chaque quantité de paillis selon la formule :

$$Gain = \frac{(Y_{mulch} - Y_{sansmulch})}{Y_{sansmulch}} \quad (19)$$

On représente alors la variabilité interannuelle du gain obtenu par paillis (figure 8) :

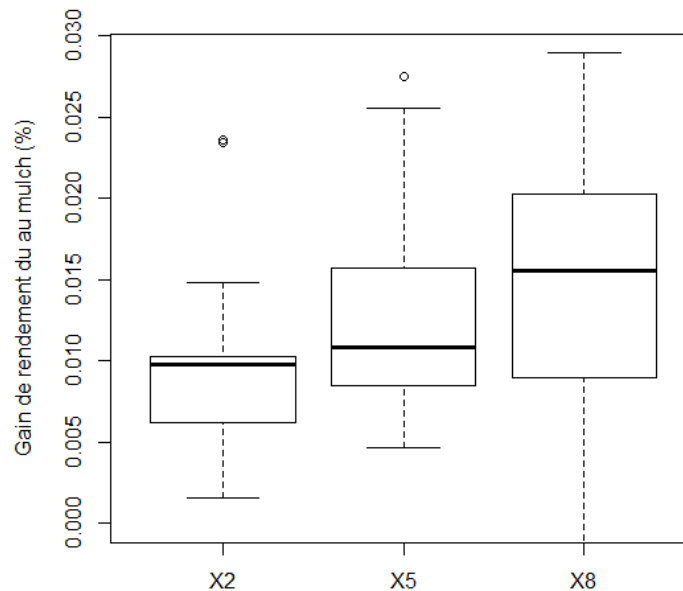


Figure 8: Taux d'augmentation du rendement dû à l'ajout de mulch par quantité de biomasse épanchée. X2 = 2T.ha⁻¹, X5 = 5T.ha⁻¹, X8 = 8T.ha⁻¹

Les rendements sont augmentés grâce à l'ajout de paillis mais dans des proportions très faibles (de 1 à 3% de rendement en plus). Ceci peut s'expliquer par le faible niveau des taux de ruissellement observés dans la région (en moyenne 11, 1.4, 0.8 et 0.6% de pluie ruisselée par précipitations pour respectivement 0, 2, 5 et 8t.ha⁻¹ de mulch, pour des ruissellements se déclenchant à partir de 4mm de précipitations minimum). La présence de paillis permet une baisse des quantités d'eau ruisselée, même faible, ce qui permet une meilleure infiltration de l'eau, un meilleur remplissage de la réserve donc une plus grande disponibilité de l'eau pour la plante, et ainsi une légère hausse de rendements.

Vu le faible niveau d'augmentation des rendements par le mulch, on peut se demander si toute la quantité d'eau non-ruisselée par le mulch est effectivement utilisée par la plante. On s'intéresse alors au drainage cumulé sur l'ensemble de la saison par quantité de mulch épanchée (figure 9) :

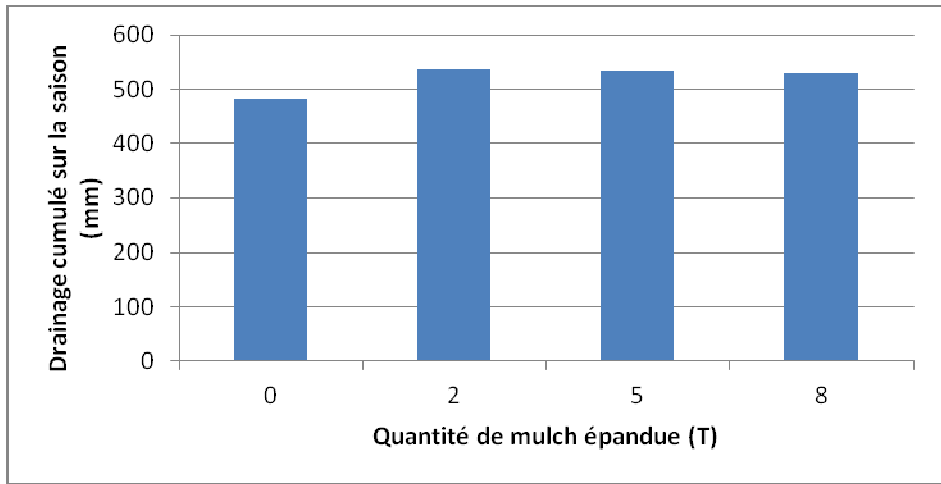


Figure 9: Quantité totale d'eau drainée par saison en fonction de la quantité de mulch épandue

L'eau économisée grâce au mulch est en fait en partie évacuée dans le sol par drainage. Elle ne peut être absorbée et métabolisée par la plante via la transpiration donc ne permet pas une hausse significative des rendements.

Ainsi la présence de paillis ne permet pas des gains de rendements assez importants pour combler les pertes dues au stress hydrique. On peut alors s'intéresser à l'influence des dates de semis sur les rendements finaux afin d'essayer de mettre en avant des périodes de semis plus propices à une réduction du stress subi par les cultures.

3.5 Influence du taux de ruissellement sur l'effet des couvertures végétales

On compare alors les niveaux de rendement obtenus selon les taux de ruissellement de base et avec une réduction des ruissellements par le paillis (figure 10). Un ruissellement de base faible correspond à ce qui est observé sur le terrain, en moyenne 5% ; un ruissellement fort correspond à ce qui a déjà observé dans la région du Lac, soit 30% en moyenne (Goujon et al., 1968).

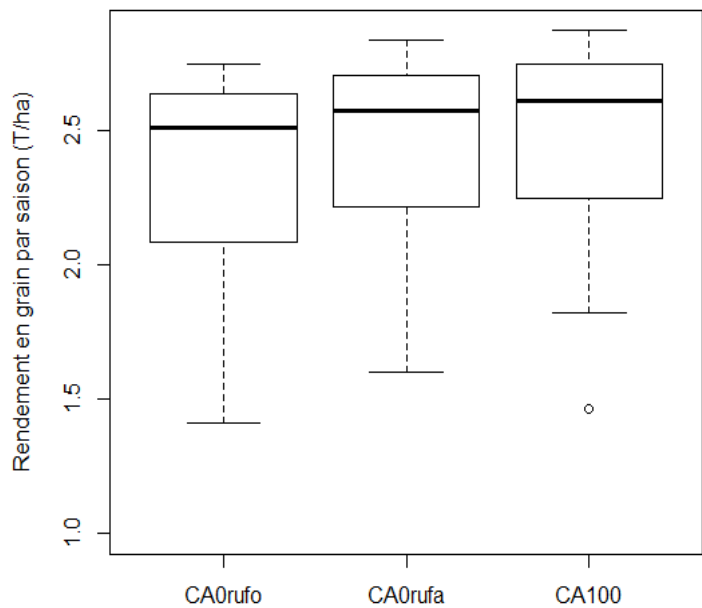


Figure 10: Niveau de rendement en fonction des taux de paillis et de ruissellement. CA0rufo, pas de paillis ruissellement de base fort ; CA0rufa, pas de paillis ruissellement faible ; CA100, 100 de sol couvert ruissellement réduit par le paillis

Ainsi la hausse de rendements due à l'apport de paillis est d'autant plus importante que le taux de ruissellement de base est élevé. La variabilité des rendements est également réduite par l'apport de mulch. L'agriculture de conservation semble donc devenir intéressante du point de vue de la réduction des stress hydriques dans le cas où les ruissellements de base sont importants. On ne dispose cependant pas de suffisamment d'informations sur les taux de ruissellement dans la région du Lac pour déterminer si ces cas sont beaucoup représentés.

On peut alors s'intéresser à l'influence des dates de semis sur les rendements finaux afin d'essayer de mettre en avant des périodes de semis plus propices à une réduction du stress subit par les cultures.

3.6 Sensibilité des différents systèmes au stress hydrique

On cherche à mettre en avant si d'autres paramètres de l'itinéraire que la quantité de mulch épandue peuvent avoir une influence sur la sensibilité de la culture au stress hydrique. On s'intéresse alors à la variabilité des rendements obtenus sur la série climatique testée, en distinguant les dates de semis (1/11, 16/11, 1/12, 16/12, 1/01, 16/01, 1/02) et les quantités de mulch épandues (0, 2 et 8 t.ha⁻¹).

On constate que les niveaux de rendement sont très dépendants des dates de semis (figure 10). Les semis effectués entre le 16 novembre et le 16 décembre permettent les rendements les plus élevés. Cette période particulière semble également garantir les rendements les plus stables d'une année à l'autre (écart-type plus faible). Ceci est en corrélation avec les observations météorologiques qui montrent que c'est également la période moyenne de début des pluies.

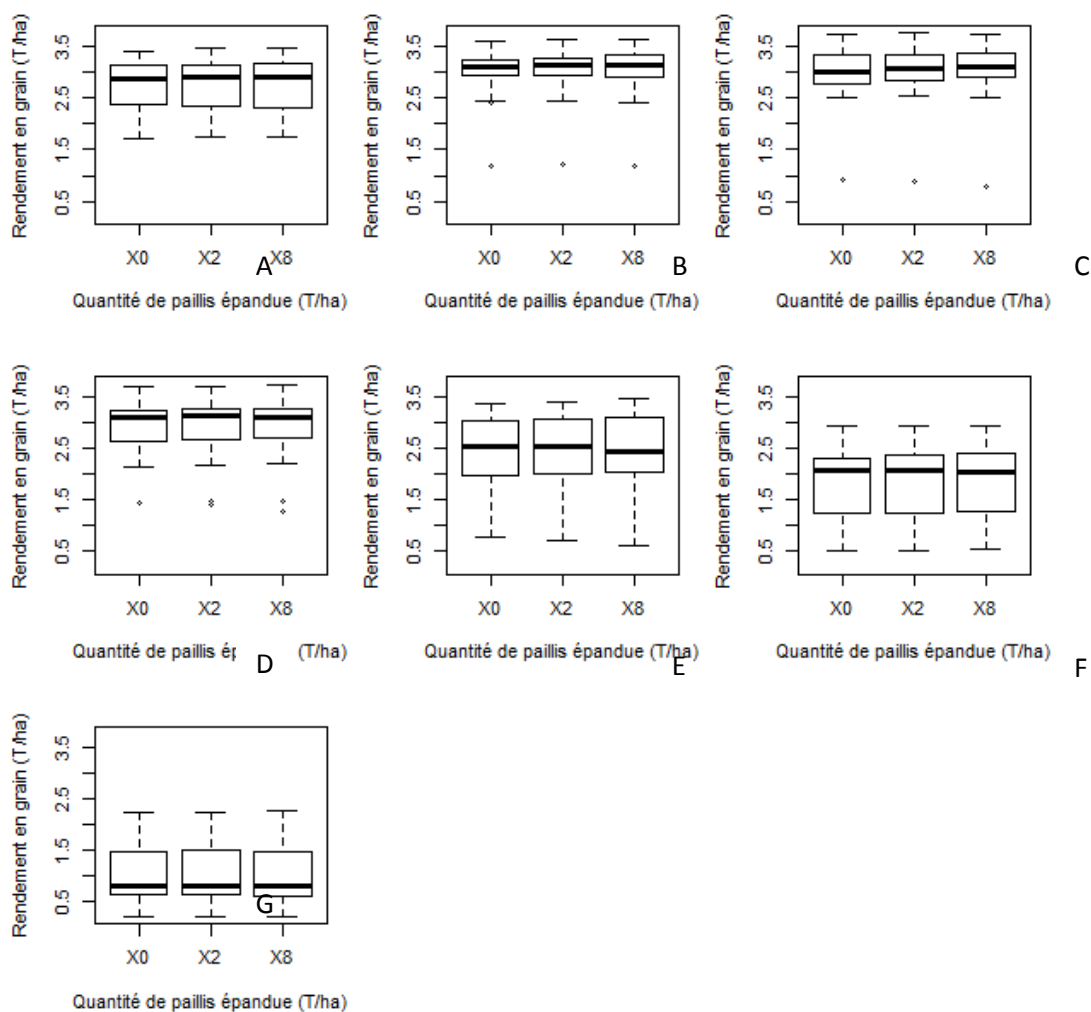


Figure 11: Variabilité des rendements en grain en fonction de la quantité de mulch épandue pour différentes de semis. En A semis le 01/11, en B semis le 16/11, en C semis le 01/12, en D semis le 16/12, en E semis le 01/01, en F semis le 16/01, en G semis le 01/02. X2 = 2T.ha⁻¹, X5 = 5T.ha⁻¹, X8 = 8T.ha⁻¹

La variabilité des rendements est donc plus importante en semis précoce (<16/11) ou tardif (>01/01). Un semis précoce peut correspondre au début d'une saison des pluies auquel cas la culture profitera pleinement de la pluviométrie et aura un bon rendement, ou bien être trop tôt par rapport à l'arrivée des premières pluies ce qui entraîne un stress hydrique important à la levée et des rendements beaucoup plus faibles ; Un semis tardif peut correspondre au début d'une saison des pluies auquel cas les rendements seront élevés, ou être trop tard par rapport à l'arrivée des premières pluies, ce qui entraîne un retard de développement car la plante n'a pas profité de l'intégralité des pluies.

On a donc mis en avant une fenêtre de dates de semis pour lesquelles les rendements sont à la fois les plus élevés et les plus stables d'une année à l'autre : du 16/11 au 16/12 inclus. La quantité de mulch n'a pas vraiment d'impact sur les niveaux des rendements. Ceci est dû aux faibles niveaux de ruissellement observés (cf. 3.4).

3.6 Discussion

3.6.1 Analyse du dispositif expérimental

L'utilisation des données expérimentales est toujours nécessaire lorsque l'on a recours à la modélisation. Il est essentiel de s'assurer que le modèle utilisé représente au mieux les phénomènes observés sur le terrain étudié. Dans le cadre de cette étude, un certain nombre d'expérimentations mises en place à travers Madagascar ont permis de caler le modèle PYE aux conditions du Lac Alaotra. On a ainsi un modèle permettant de simuler des processus tels qu'ils pourraient être observés au Lac en conditions non-limitantes.

La validation du modèle aurait cependant pu être consolidée si d'avantage de données avaient été disponibles. Cela aurait permis de limiter les écarts simulé/observé dus aux variables non prises en compte par le modèle. En effet la compétition avec les adventices, les ravageurs et maladies sont autant de facteurs qui ne sont non pris en compte, multiplier le nombre d'années utilisées pour le paramétrage réduit les erreurs d'ajustement dues à ces paramètres. Des efforts ont cependant été faits pour sélectionner au mieux les parcelles le plu représentatives possibles des croissances potentielles simulées par le modèle. D'autre part une mesure directe de la réserve utile aurait donné plus de poids à sa prise en compte dans la description des différences entre systèmes.

3.6.2 Utilisation d'un modèle d'estimation des rendements atteignables

On a dans le cadre de cette étude choisi d'utiliser un modèle simple ne prenant en compte que le climat, les propriétés du sol et les caractéristiques de l'espèce. Cela réduit l'erreur sur les paramètres d'entrée (Passioura, 1996), d'autre part le modèle est peu gourmand en données d'entrée ce qui s'accorde avec le faible jeu de données observées disponibles sur le terrain.

L'intérêt principal de l'utilisation d'un modèle simulant les rendements potentiels et atteignables est de s'affranchir de toutes les variations de rendements dues à des variables non mesurées pour se concentrer sur l'effet de variables d'intérêt, en l'occurrence les composantes du bilan hydrique, les quantités de paillis et les dates de semis. L'utilisateur maîtrise les facteurs ayant une influence sur la variabilité des sorties, la discussion en est d'autant plus facilitée.

3.6.3 Sensibilité des systèmes de culture pratiqués dans la région du Lac au risque climatique

La pluviométrie totale en saison humide est très variable d'une année à l'autre de même que la répartition des épisodes pluvieux sur la saison. Par ailleurs le nombre moyen d'épisodes de sécheresse est très important. Il aurait été intéressant de s'intéresser à l'évolution de la variabilité de la pluviométrie au cours de la saison. En effet on sait que de manière générale, la mise en place de la saison des pluies en climat tropical est toujours variable d'une année à l'autre. Une installation tardive lors d'un semis précoce représente par exemple un risque important de faible rendement pour l'exploitation. Ce type d'analyse de la variabilité pluviométrique aurait permis d'approfondir la discussion sur le choix des dates de semis les plus adaptées.

Les systèmes sous couverture n'ont pas d'influence importante sur le niveau et la variabilité des rendements dans la région du Lac Alaotra. Les niveaux de ruissellement étant faibles, l'effet du paillis est limité. Par ailleurs une partie de l'eau économisée est évacuée par

drainage sous les racines, ce qui ne permet pas son absorption par les racines et représente même un risque de lessivage des nutriments. Il ne faut cependant pas perdre de vue les différents avantages déjà démontrés de la riziculture : augmentation de la fertilité des sols (Scopel et al., 2005; Erenstein, 2003), protection thermique au rayonnement solaire (Husson, 2009), protection contre les adventices (Husson, 2009; Irintsoa Rasolofo, 2010).

4. Conclusion et perspectives

Cette étude a été conduite à partir des dispositifs expérimentaux mis en place au CALA et à Ivory. L'objectif était d'étudier l'interaction eau-pratiques culturales sur la variabilité des rendements du riz pluvial par voie de modélisation.

On a pu montrer qu'il était possible d'utiliser les modèles de culture et de le paramétrer dans les conditions du Lac Alaotra pour évaluer le poids du facteur hydrique dans la variabilité interannuelle du rendement.

L'étude des données météorologiques locales a permis de définir le risque climatique dans la région du Lac Alaotra sous l'aspect notamment de la pluviométrie : forte variabilité pluviométrique interannuelle et nombre important d'épisodes de sécheresse.

Dans ces conditions la riziculture pluviale est très sensible au stress hydrique. On a pu mettre en avant que les rendements simulés en conditions limitées seulement par le stress hydrique sont très faibles par rapport à ce qui serait proposé sans stress hydrique.

Les systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal n'ont pas vraiment d'intérêt pour l'amélioration des rendements. Ceci est dû aux faibles niveaux de ruissellement observés dans la région. Ces taux de ruissellement correspondent peut-être aux conditions pédologiques locales très particulières sur les essais, en testant l'impact des paillis sur sols à plus fort taux de ruissellement on met en avant un impact plus important des SCV dans ces conditions. Il serait donc intéressant de prospecter les taux de ruissellement dans la région du Lac Alaotra afin de mieux définir dans quels cas l'agriculture de conservation aurait un impact plus important sur la réduction des stress hydriques. On a cependant pu mettre en avant une fenêtre de date de semis garantissant le plus de sécurité pour les exploitants.

Les modèles sont des outils performants pour tester l'impact de facteur particulier, ici le facteur hydrique, sur les rendements. Il ne faut cependant pas perdre de vue les autres facteurs qui ne sont pas pris en compte dans cette étude : la fertilisation, les maladies et ravageurs. Les SCV jouent un rôle sur chacun de ces facteurs et il serait intéressant de connaître leur influence dans la mise en place des rendements. Le paillis, notamment en cas de couverture de légumineuse, a une influence sur le bilan azoté du sol donc sur les rendements. Ajouter un module sur le bilan azoté dans le modèle permettrait de prendre en compte le poids de ce facteur et de discuter d'avantage sur l'intérêt des SCV dans la région du Lac Alaotra. On pourrait ainsi ajouter autant de module que l'on souhaitera tester de facteurs.

Bibliographie

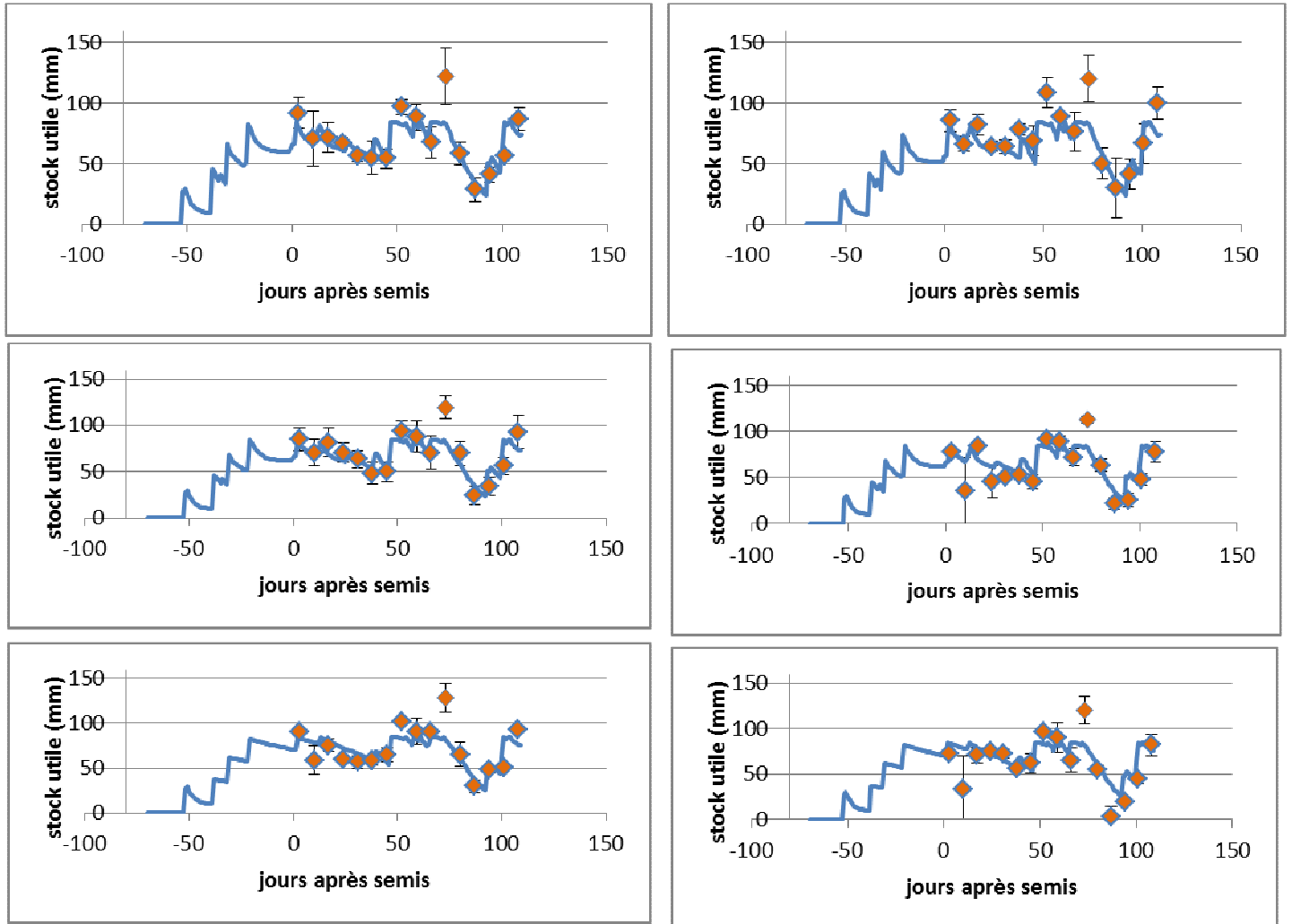
- Adekalu, K.O., Olorunfemi, I.A. et Osunbitan, J.A., 2007. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. *Bioresource Technology*, 98(4): 912-917
- Affholder, F., 1995. Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crop Res.* 41, 109-121.
- Affholder F., Tittonell P., Corbeels M., Roux S., Motisi N., Tixier P., Wery J., 2012 Ad Hoc modeling in agronomy: what have we learned in the last 15 years? *Agronomy Journal*. 104, 3
- Affholder F., Poeydebat C., Corbeels M., Scopel E., Tittonell P., 2012. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Research* 143, 106-118
- Aggarwal PK, Mall RK, 2002. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. *Clim Chang* 52:331 –343
- Bernett, A.P., Disketer, E.G., Richardson, E.C., 1967. Evaluation of mulching methods for erosion control on newly prepared and seeded highway backslope. *Agronomy Journal* 59, 83–85
- Bertrand G., 2012. Variabilité du rendement du riz pluvial dans les essais agronomiques de la matrice SCRiD à Vakinankaratra : analyse de l'interaction eau-pratiques culturales par voie de modélisation. Mémoire, 35p
- Charreton, M.B., Raunet, M. et Naudin, K., 2006. Les SCV : une solution alternative aux systèmes de culture conventionnels dans les pays touchés par la désertification. Les dossiers thématiques du Comité Scientifique Français de la Désertification numéro 4. www.agropolis.fr/pdf/CSFD/CSFD/dossier_4.pdf
- Dusserre J., Douzet J-M., Ramahandry F., Sester M., Muller B., and J. Rakotoarisoa (2010). Identification of the main constraints for upland rice crop in direct-seeding mulch-based cropping systems under the high altitude conditions of the Madagascar Highlands. *Africa Rice Congress 2010, Bamako, Mali, 22-26 mars 2010*
- Erenstein, O., 2003. Smallholder conservation farming in the tropics and sub-tropics: a guide to the development and dissemination of mulching with crop residues and cover crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 100: 17-37
- FAO, 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. *FAO irrigation and drainage paper No 56*. 300p
- G.C. Topp, *Water Resources Research*, vol. 16, N°3, pp. 574-582, 1980
- Gerardeaux, 2011. Positive effects of climate change on rice in Madagascar. *Springer, Agron. Sustain. Dev.* 11p

- Goujon, M. M., de Vergnette, B., de Coignac, B., & Roche, M., 1968. Influence du couvert végétal sur le ruissellement et les pertes en terre 2ème partie. Bois et forêt des tropiques, (119), 17–27.
- Hardaker, J., Huirne, R.B.M., Anderson, J., 1997. Coping with Risk in Agriculture. CAB International, Wallingford.
- Husson, O. Charpentier, H., Naudin, K., Razanamparany, C., Moussa, N., Michellon, R., Andrianasolo, H., Razafintsalama, H., Rakotoarinivo, C., Rakotondramanana, Enjalric, F., Seguy, L., 2009. Le choix des cultures, associations et successions adaptées aux contraintes agro-climatiques. Vol II. Chap 1. 24pp.
- Irintsoa Rasolofo, 2010. Caractérisation des effets de la couverture végétale sur le contrôle de l'érosion hydrique et sur la maîtrise de l'émergence des adventices au lac Alaotra. Mémoire, Université d'Antananarivo. 43p.
- Lal, R., 1979. Soil erosion on alfisols in Western Nigeria II effect of mulch rates. Geoderma 16, 377–382
- Lehmann, E. L.; Casella, George (1998). *Theory of Point Estimation* (2nd ed.). New York: Springer.
- Luquet D, Dingkuhn M, Kim HK et al, 2006. EcoMeristem, a model of morphogenesis and competition among sinks in rice. 1. Concept, validation and sensitivity analysis. Funct Plant Biol 33:309 –323.
- LUU N. Q., 2012. Introduction d'une culture de printemps dans les systèmes de culture des « terres irrigables » des montagnes du Nord du Vietnam. Approche par modèle agroclimatique. These supagro. 161p.
- Meyer, L.D., Wischmeier, W.H., Forster, G.R., 1970. Mulch rate required for erosion control on steep slopes. Soil Science Society American Proceedings 34, 928–931
- Michellon, R., Razanamparany, C., Moussa, N., Andrianasolo, H., Fara Hanitriniaina, J. C, Razakamanatoanina, R., Rakotovazaha, L., Randrianaivo, S., Rakotoniaina, F. Projet d'appui à la diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar. 2005, Rapport de campagne 2003 – 2004. Hautes terres et Moyen Ouest. GSDM. Financement AFD–FFEM – CIRAD – MAEP. Antsirabe, Madagascar : Tafa/CIRAD, 107p.
- Nain A, Kersebaum K, 2007. Calibration and validation of CERES model for simulating. In: Kersebaum K, Hecker J-M, Mirschel W, Wegehenkel M (eds) Modelling water and nutrient dynamics in soil – crop systems. Springer, Netherlands, pp 161 – 181
- Passioura, J.B. 1996. Simulation models: Science, snake oil, education, or engineering? Agron. J. 88:690–694. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800050002
- Penot, E., & Rakotoarimanana, A. (2011). Savoirs, pratiques, innovations et changement de paradigme de l'agriculture dans la région du lac Alaotra (Madagascar). *publications.cirad.fr*.

- Rakotomalala J., 2011. Caractérisation de l'effet de la dégradation des résidus sur l'offre en azote et l'émergence des adventices en agriculture de conservation au lac Alaotra. Mémoire, 38p.
- Razafimbelo T.M, Albrecht A, Basile I, Borschneck D, Bourgeon G, Feller C, Ferrer H, Michellon R, Moussa N, Muller B, Oliver R, Razanamparany C, Seguy L and Swarc M. 2006. Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols* 13: 113–127.
- Scopel E., Muller B., Arreola Tostado J.M., Chavez Guerra E. and Maraux F., 1998. Quantifying and Modeling the Effects of a Light Crop residue mulch on the Water Balance: an Application to Rainfed Maize in Western Mexico. XVI Congrès Mondial de Science du Sol. 20-26 août 1998, Montpellier, France.
- Scopel, E., Findeling, A., Chavez Guerra, E., 2005. Impact des techniques semis direct avec paillis sur la réduction de l'érosion et l'évolution des stocks de carbone de maïs pluvial en zones semi-arides de l'Ouest mexicain.
- Scopel, E., Douzet, J-M, Macena da Silva, F-A., Cardoso, A., Aloisio, J., Moreira A., Findeling, A., Bernoux, M., 2005. Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les cerrados brésiliens. *Cahiers Agricultures* vol. 14, n° 1, janvier-février 2005
- Sinclair, T.M., Seligman, N.G., 1996. Crop modelling: from infancy to maturity. *Agron.J.* 88, 698–704
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Corbeels, M., Giller, K.E., 2008. Yield gaps, nutrient use efficiencies and response to fertilisers by maize ac
- Unger, P.W. et Parker, J.J., 1976. Evaporation Reduction from Soil with Wheat, Sorghum, and Cotton Residues. *Soil Science Society of America Journal*, 40: 938-942. Vincent B. et al., 2008. Modélisation du bilan hydrique : l'étape clé de la détermination des paramètres et des variables d'entrée. *RDV techniques hors-série n°4 - 2008 - ONF*
- van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Res.* 52, 197–208
- van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance – a review. *Field Crops Res.* 143, 4–17
- van Keulen, H., 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. PUDOC, Wageningen, The Netherlands

ANNEXE I: Ensemble des résultats du calage du bilan hydrique

◆ StockHobs
— StockHsim



Stock utile simulé et observé au cours de la saison. A gauche, simulations sur pente faible, à droite, simulation sur pente forte. De haut en bas : taux de couverture de 0, 30 et 100%



Diplôme : Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage

Spécialité : Horticulture

Spécialisation : Gestion Durable du Végétal en Horticulture et aménagement Paysager

Enseignant référent : Sylvain Charpentier

Auteur(s) : Thomas Abrell

Organisme d'accueil : Cirad

Date de naissance* : 04 décembre 1990

Adresse : Avenue Agropolis, 34 398

Montpellier Cedex 5

Nb pages : 33 Annexe(s) : 1

Année de soutenance : 2013

Maître de stage : Eric Scopel

Titre français : Etude du risque climatique en riz pluvial et de ses interactions avec les systèmes de culture dans la région du Lac Alaotra

Titre anglais : Crop systems and hydric stress interaction study for rainfed rice in Alaotra lake region.

Résumé : A Madagascar, dans la région du lac Alaotra, la forte pression démographique entraîne une surexploitation des terres arables. Il en résulte une érosion importante des terrains en pente ainsi que des pertes conséquentes en fertilité des sols. D'autres problèmes tels que l'accès aux produits phytosanitaires et l'instabilité des rendements due à une forte variabilité climatique menacent également la productivité de la riziculture pluviale, principale culture du pays. Le semis direct sous couverture végétale apporte des solutions à ces problématiques. Il repose sur trois piliers fondamentaux : le non labour des parcelles, la rotation appropriée des cultures et la présence permanente d'une couverture végétale sur le sol. Son efficacité a déjà été démontrée dans les Hautes-Terres de Madagascar mais peu d'études ont été réalisées dans la région du Lac Alaotra qui a un climat particulier. L'objectif de cette étude est de modéliser la riziculture pluviale dans cette région grâce au modèle PYE. Le modèle sera paramétré à partir des essais effectués dans la région et de la variété de riz utilisée. On pourra ainsi simuler la riziculture pluviale sur la base d'une série climatique de 18 années relevée au même endroit afin de comparer la sensibilité des différents systèmes de culture au stress hydrique. Les résultats montrent que l'agriculture de conservation ne permet pas une amélioration significative des niveaux de rendements, sauf sur les parcelles soumises à des forts taux de ruissellement.

Abstract : In the area of Alaotra Lake in Madagascar the rising demographic pressure leads to an overexploitation, causing an important erosion of slope plots and an loss of soil fertility. Other problems like access to phytosanitary substances and instability of yields due to climatic variability pose a threat to rice productivity, main culture of this country. Direct-seeding mulch-based cropping (DMC) systems have solutions to those problems. There are based on three fundamental pillars: no-till of soils, appropriated rotation of cultures and presence of permanent mulch on the ground. Their effectiveness has already been proved in different parts of the world but few studies have been made in the area of Alaotra Lake, where there is a specific climate. The aim of this study is to model rice culture in this area thanks to PYE model. Trial plots cultivated in this region will be used to calibrate the model. In this context Rice crops will be simulated over 18 years from a climatic series taken in the Lake region. It will permit to compare the sensibility of different crop systems to hydric stress observed in the region. Results show that conservation agriculture doesn't lead to better yields, except on plots where run-off levels are very high

Mots-clés : riziculture pluviale, modèle biophysique, Potential Yield Estimator, semis direct sous couvert végétal, ruissellement, Lac Alaotra, Madagascar

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires

Document à déposer sur moodle en format txt